

**Diplomarbeit**  
**Markus Brückner**

**Äquivalenzstereomikrofonie**  
**-**  
**Vergleiche und neue Methoden**

**Datum der Fertigstellung: 20.08.2001**

## **Inhaltsverzeichnis**

1. Einleitung	3
2. Stereofones Hören	3
2.1. Interaurale Laufzeitunterschiede	5
2.2. Interaurale Pegelunterschiede	7
2.3. Zusammenwirken von Pegel- und Laufzeitdifferenzen	8
3. Stereofones Hören bei Lautsprecherwiedergabe	8
3.1. Phantomschallquellen	9
3.2. Stereohörfläche	9
3.3. Laufzeitunterschiede bei Lautsprecherwiedergabe	10
3.4. Pegelunterschiede bei Lautsprecherwiedergabe	11
3.5. Zusammenwirken von Pegel- und Laufzeitdifferenzen bei Lautsprecher-wiedergabe	11
4. Stereomikrofonie	12
4.1. Grundlagen und Anforderungen an eine stereofone Aufnahme	12
4.2. Stereomikrofonverfahren	12
4.2.1. Pegel- oder Intensitätsstereofonie am Beispiel des XY-Verfahrens	12
4.2.2. Laufzeitstereofonie am Beispiel des AB-Verfahrens	15
4.3. Äquivalenzstereomikrofonie	16
4.3.1. Theoretische Grundlagen der gemischten Stereofonie	18
4.4. Vorstellung von drei Äquivalenzstereofonieverfahren	22
4.4.1. ORTF	22
4.4.2. NOS	24
4.4.3. LTE	25
5. Vergleich, Bewertung und Analyse von verschiedenen Stereomikrofonieverfahren anhand von Hörbeispielen	27
5.1. Beispiele zu den gemischten Verfahren im Vergleich mit XY- und AB-Verfahren	27
5.1.1. Produktion der Hörbeispiele	27
5.1.2. Vergleich und Bewertung der fünf Verfahren	28
5.2. Beispiele für die praktische Anwendung des LTE-Verfahrens	30
5.2.1. LTE als Raummikrofonie am Schlagzeug	30
5.2.2. LTE als Hauptmikrofonie für klassische Aufnahmen	31
6. Schlußbetrachtung	32
Quellen- und Literaturverzeichnis	33
Abbildungsverzeichnis	33

## **1. Einleitung**

In der heutigen Zeit von hochgezüchteter Popmusik, die produktionstechnisch nichts mehr mit der realen Abbildung eines akustischen Klangereignisses zu tun hat, geraten stereofone Aufnahmetechniken immer mehr in Vergessenheit. Der Eindruck von der stereofonen Breite eines Songs, der die Charts dominiert, ist schon lange nicht mehr von einer Aufnahmetechnik mit einem Stereo-hauptmikrofon abhängig.

Und auch wenn der Trend zur künstlich erzeugten Stereophonie anhält, erscheint es mir doch sinnvoll, den Ursprung und den Nutzen der stereofonen Aufnahme im Auge (und im Ohr) zu behalten.

Aus diesem Grunde möchte ich mich mit dem großen Thema der Stereomikrofonie befassen und speziell auf Verfahren der Äquivalenzstereophonie eingehen, da diese nach meiner Auffassung die natürlichste Abbildung eines Klanggeschehens reproduzieren.

Theoretische Grundlagen des menschlichen Hörens und der Lautsprecherwiedergabe sind Bedingung für das Verständnis der Äquivalenzstereophonie und werden zu Anfang erläutert.

Im Detail werde ich dann auf einzelne bekannte und neue Verfahren der gemischten Stereophonie eingehen und deren Bedeutung in der Praxis erläutern.

Dazu habe ich eine CD mit Hörbeispielen produziert, die im vorletzten Kapitel dem Vergleich und der Bewertung der einzelnen Verfahren dienen soll.

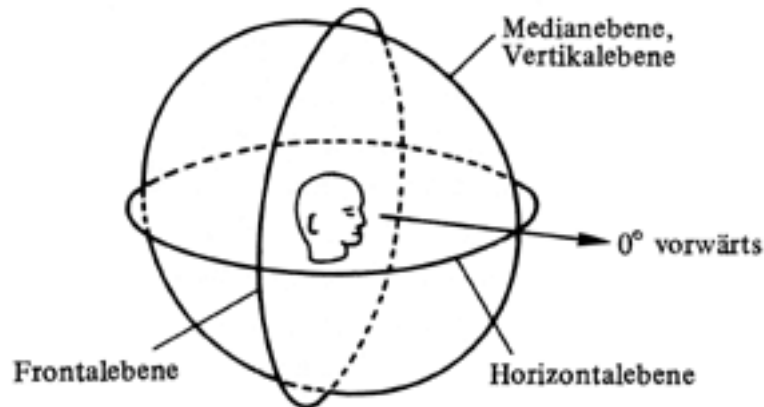
Die Arbeit soll insgesamt zu einem besseren Verständnis für stereofone Aufnahmen beitragen. Wer das letzte Quäntchen aus seiner stereofonen Aufnahme herauskitzeln möchte oder einfach nur sein Grundwissen über Äquivalenzstereophonie erweitern möchte, dem wird diese Arbeit bestimmt eine Hilfe sein.

## **2. Stereofones Hören**

Stereofones Hören (von stereós, gr. räumlich) ist neben dem dreidimensionalen Sehen die wichtigste Sinneswahrnehmung zur räumlichen Lokalisation eines akustisch-visuellen Ereignisses.

Auch ohne unsere visuelle Wahrnehmung können wir ein Klangereignis orten, ihm eine Richtung und eine ungefähre Entfernung zuordnen. Dies wird ermöglicht durch das beidohrige (binaurale) Hören: Die Unterschiede der Schallsignale zwischen beiden Ohren (interaurale Differenzen), werden vom Gehirn ausgewertet und in eine Richtungsinformation umgesetzt. Maßgebliche

Parameter der Richtungslokalisierung auf der Horizontalebene sind Laufzeitdifferenzen und frequenzabhängige Pegeldifferenzen, die zwischen linkem und rechtem Ohr auftreten. Da sich die vorliegende Arbeit vornehmlich mit der Lokalisation in der Horizontalebene beschäftigt, werde ich die Bedingungen für die Lokalisation in der Frontal- und Medianebene vernachlässigen.



Das Prinzip der Lokalisation ist folgendes: Ein Schallsignal gelangt im allgemeinen nicht gleichzeitig an beide Ohren, sondern wird an dem der Schallquelle zugewandten Ohr früher eintreffen (Laufzeitunterschied). Auch gelangt durch die akustische Abschattung des Kopfes und die Formgebung der Ohrmuschel das Schallsignal frequenzabhängig mit geringerem Pegel an das Ohr, welches der Schallquelle abgewandt ist (Pegelunterschied). Durch die Kombination dieser beiden Phänomene kann ein Klangereignis lokalisiert werden.

Sobald von Lokalisation die Rede ist, muß natürlich geklärt werden, wie genau das Auflösungsvermögen unserer Ohren überhaupt ist. Jens Blauert [1] spricht hier von Lokalisationsunschärfe als Eigenschaft der Lokalisation. Der Wert der Lokalisationsunschärfe (in Grad) beschreibt die kleinste Auslenkung der Schallquelle um eine hörbare Richtungsänderung wahrnehmbar zu machen. Die Lokalisationsunschärfe für Veränderungen des Seitenwinkels der Schallquelle wird als kennzeichnend für das maximale räumliche Auflösungsvermögen des Gehörs angesehen. Hierzu wurden schon seit 1920 Versuche durchgeführt.

Autor, Jahr	Signalart	Lokalisations- unschärfe etwa
KLEMM 1920	Klicks	0,75° bis 2°
KING und LAIRD 1930	Klickfolge	1,6°
STEVENS und NEWMAN 1936	Dauertöne	4,4°
SCHMIDT et al. 1953	Dauertöne	> 1°
SANDEL et al. 1955	Dauertöne	1,1° bis 4,0°
MILLS 1958	Dauertöne	1,0° bis 3,1°
STILLER 1960	Schmalbandrauschen cos <sup>2</sup> -Töne	1,4° bis 2,8°
BOERGER 1965a	Gauß-Töne	0,8° bis 3,3°
GARDNER 1968a	Sprache	0,9°
PERROTT 1969	Tonimpulse mit unter- schiedlicher Flanken- steilheit und Frequenz	1,8° bis 11,8°
BLAUERT 1970b	Sprache	1,5°
HAUSTEIN und SCHIR- MER 1970	Breitbandrauschen	3,2°

Die untere Grenze für die Lokalisationsunschärfe liegt nach dieser Tabelle bei etwa 1°, welches für die Betrachtungen über Stereomikrofonie ausreichend sein soll.

Doch nun zu den maßgeblichen Parametern für die Lokalisation.

## 2.1. Interaurale Laufzeitunterschiede

Dieser Parameter des Richtungshörens wird als der wichtigste erachtet. Er ist zu einem großen Teil an der räumlichen Wahrnehmung unseres Gehöres beteiligt. Die längste Zeit, die ein Schallsignal braucht, um von einem Ohr zum anderen zu gelangen, beträgt 0,63 ms. Dieser Wert ist auf den Wegunterschied zwischen beiden Ohren zurückzuführen. Der Ohrabstand wird im Allgemeinen mit 17,5 cm angegeben. Dieser Wert ist korrekt, wenn man diesen Abstand als Luftlinie betrachtet. Der Schall muß aber eine größere Strecke zurücklegen, da der Kopf ein akustisches Hindernis zwischen beiden Ohren darstellt. Wenn man nun den Kopf und seine Form in diesen Weg miteinbezieht, kommt man auf einen Wert von etwa 21,5 cm, der einer maximalen Laufzeitdifferenz von 0,63 ms zu Grunde liegt.

$$\text{Laufzeit } t = \frac{\text{Wegunterschied } d}{\text{Schallgeschwindigkeit } c} = \frac{0,215 \text{ m}}{340 \text{ m/s}} = 0,6324 \text{ ms}$$

Bei diesem maximalen Wert von 0,63 ms wird somit theoretisch eine Lokalisation von 90° seitlicher Auslenkung hervorgerufen.

Der Wegunterschied von 21,5 cm zwischen den Ohren hat nun auch zur Folge, daß interaurale Laufzeitdifferenzen zwar über den gesamten Frequenzbereich wirksam, jedoch nicht qualitativ gleichberechtigt sind.

Im Allgemeinen werden dem Schallsignal Laufzeit- und Phasenunterschiede entnommen. Wenn ein Schallsignal allerdings eine Frequenz aufweist, deren Wellenlänge niedriger ist, als der Abstand zwischen beiden Ohren, so werden die Unterschiede zwischen den Hüllkurven der Signale zur Lokalisation herangezogen. Die Frequenz des Signals muß dazu also eine Wellenlänge von unter 21,5 cm zeigen. Dies entspricht etwa 1,6 kHz.

$$\text{Frequenz } f = \frac{c}{\text{Wellenlänge } l} = \frac{340 \text{ m/s}}{0,215 \text{ m}} = 1581 \text{ Hz}$$

Dieses behauptet Blauert in „Räumliches Hören“ [1]. Er geht davon aus, daß in dem Frequenzbereich unter 1600 Hz die zeitliche Verschiebung der Signale vom Gehör unbewertet bleibt und nur der Verlauf der Hüllkurven für die Lokalisation eine Rolle spielt.

Dem widerspricht Dickreiter in „Handbuch der Tonstudioteknik“ [2]. Er meint, daß Phasen- und Zeitdifferenzen gerade in diesem Frequenzbereich zu einer korrekten Ortung führen. Er stützt sich im Gegensatz zu Blauert jedoch nicht auf erklärende Untersuchungen. Doch Blauerts Untersuchungen befassen sich hauptsächlich mit modulierten Sinustönen, statt mit praxisnahen Signalen, wie Musik oder anderen impulshaften Signalen.

Meiner Meinung nach ist es daher weniger sinnvoll, entweder nur differente Hüllkurvenverläufe oder nur Phasen- bzw. Laufzeitdifferenzen für die Lokalisation in einem bestimmten Frequenzbereich verantwortlich zu machen.

Fest steht, daß bei tiefen Frequenzen, bedingt durch die große Wellenlänge (relativ zum Ohrabstand) die Phasenlaufzeit einen entscheidenden Einfluß auf das Lokalisationsvermögen hat.

Bei hohen Frequenzen, bei denen die Wellenlänge schon ein mehrfaches des Ohrabstands ist, werden eher Laufzeitunterschiede zwischen den einzelnen Amplitudenwerten der Schwingung bedeutend. Doch ist durch die Doppeldeutigkeit der Phasenlage die Ortung nicht sehr scharf.

Dies ist auch eine Erklärung dafür, daß das Gehör bei besonders tiefen Frequenzen ein sehr schlechtes Lokalisationsvermögen aufweist:

Der Unterschied der Phasenlage (an beiden Ohren) einer Frequenz von z.B. 80

H<sub>z</sub> bei einer seitlichen Auslenkung der Schallquelle von 90° (komplett von einer Seite, entsprechend einem Laufzeitunterschied von 0,63 ms) ist aufgrund der hohen Wellenlänge so verschwindend gering, daß er vom Ohr kaum wahrgenommen wird.

Hingegen beträgt der Unterschied der Phasenlage bei einer Frequenz von 790 Hz bei gleichen Konditionen bereits 180°.

## 2.2. Interaurale Pegelunterschiede

Diese Unterschiede gelten beim räumlichen Hören eher als weniger wichtig, doch nicht unbedeutend. Bedingt durch die akustische Abschattung des Kopfes und die Form der Ohrmuschel wird der Pegel eines Signals frequenzabhängig gedämpft:

Die Wellenlänge der Frequenz ist entscheidend dafür, ob das Signal womöglich um den Kopf gebeugt wird und somit theoretisch keine Pegelunterschiede auftreten. Über die Grenzfrequenz, ab der diese Beugungserscheinungen auftreten, ist man sich bis heute nicht ganz sicher.

Blauert beschreibt zwar Versuche zu diesem Thema, doch legt er sich nicht auf einen konkreten Wert fest und liefert auch leider keinen mathematischen Lösungsansatz.

Dickreiter hingegen behauptet, daß die Grenzfrequenz bei etwa 300 Hz liegt. Auch wenn er keine Begründung für diesen Wert gibt, ist anzunehmen, daß sich sein Lösungsansatz folgendermaßen gestaltet:

Er geht vermutlich davon aus, daß ein Viertel der Wellenlänge der Grenzfrequenz genügt, um die Schallwellen des Signals um den Kopf zu beugen. In diesem Fall müßte man mathematisch allerdings auf einen anderen Wert kommen:

$$\text{Wellenlänge } l = \frac{c}{f} = \frac{340 \text{ m/s}}{300 \text{ Hz}} = 1,13 \text{ m}$$

$$\frac{l}{4} = 0,2825 \text{ m}$$

Somit liegt Dickreiters Wert ein Ohrabstand von ca. 28 cm zu Grunde, der mir wohl etwas zu hoch erscheint. Wenn man mit 21,5 cm rechnet, ergibt sich ein Wert von 395 Hz als Grenzfrequenz, der wahrscheinlich Dickreiters Denkansatz

entspricht. Ob er nun damit recht hat, sei dahingestellt, da es auch Forscher gibt, die sich von aufgrund von Versuchen auf die Hälfte der Wellenlänge fixieren, wonach die Grenzfrequenz für dieses Phänomen bei knappen 800 Hz liegen würde.

Klar ist, daß es somit immer auf die Frequenzverteilung innerhalb des Signals ankommt, ob dieses gut oder schlecht zu lokalisieren ist.

Hinzu kommt, daß durch die frequenzabhängigen Pegelunterschiede in breitbandigen Signalen wie Musik oder Sprache Klangverfärbungen entstehen.

Diese Klangverfärbungen sind so subtil, daß sie von uns zwar nur unbewußt wahrgenommen werden, aber doch einen nicht unwesentlichen Teil zur korrekten Lokalisation beitragen.

### **2.3. Zusammenwirken von Pegel- und Laufzeitdifferenzen**

Bei der räumlichen Wahrnehmung unseres Ohres wirken beide Phänomene von interauralen Differenzen zusammen. Obwohl beide Mechanismen getrennt voneinander arbeiten, lassen sich Zusammenhänge herstellen: Es kann unter Umständen angegeben werden, welche Zeitdifferenz welcher Pegeldifferenz entspricht: Hierbei wurden bisher Werte zwischen  $2 \mu\text{s}/\text{dB}$  und  $200 \mu\text{s}/\text{dB}$  ermittelt. Dieser Wert ist vom Schalldruckpegel und von der Schalleinfallrichtung abhängig.

### **3. Stereofones Hören bei Lautsprecherwiedergabe**

Würde man nur einen Lautsprecher aufstellen und Signale nur über diesen wiedergeben, entsprächen die Verhältnisse denen der räumlichen Wahrnehmung. Wenn aber nun über zwei Lautsprecher wiedergegeben wird, ändert sich die Lage.

Um nähere Erläuterungen anzuführen, müssen jedoch die Bedingungen für eine korrekte Lautsprecherstereowiedergabe geklärt sein:

Die übliche Anordnung von zwei Lautsprechern bildet mit der Hörposition des Hörers ein gleichseitiges Dreieck. Die Winkel in dem die Lautsprecher zur  $0^\circ$ -Achse angeordnet sind beträgt etwa  $30^\circ$ .

Auf diese Weise wird eine stereofone Wahrnehmung hervorgerufen, bei der die Ortung einer Schallquelle nicht mehr aus einem Schallsignal gewonnen wird, sondern aus zweien. Bei der stereofonen Lautsprecherwiedergabe überlagern sich also zwei Signale, wobei jedes Ohr einen bestimmten Anteil von jedem



Lautsprecher erhält, woraus ein Richtungseindruck eines Klangereignisses bestimmt werden kann.

### **3.1. Phantomschallquellen**

Durch das Abstrahlen der Lautsprecher eines Signals mit Laufzeit- und/oder Pegelunterschieden entstehen Phantomschallquellen. Wird ein Signal von beiden Lautsprechern mit gleichem Pegel und keinerlei Laufzeitdifferenz wiedergegeben, so nimmt der Hörer nicht zwei Schallquellen wahr, sondern eine, die sich in diesem Fall, in der Mitte der horizontalen Wahrnehmungsebene (Mittelpunkt der Stereobasis) befindet. Dies ist eine Phantomschallquelle, die nun durch Veränderung der Pegel- und/oder Laufzeitunterschiede beider Signale auf der Stereobasis nach links oder rechts auswandern kann. Dies ist ein grundlegender Effekt für die Lokalisation bei stereofoner Lautsprecherwiedergabe.

Wie das Klangbild der Wiedergabe einer stereofonen Aufnahme aussieht, hängt vor allem davon ab, ob Pegel- oder Laufzeitunterschiede die Lokalisation dominieren (abhängig vom Aufnahmeverfahren).

### **3.2. Stereohörfläche**

Voraussetzung für eine saubere Lokalisation mittels der entstehenden Phantomschallquellen ist eine korrekte und (im günstigsten Fall) nicht variierende Hörposition auf einer gedachten Mittelachse zwischen beiden Lautsprechern. Wenn die Hörposition von dieser Mittelachse abweicht, entstehen durch die Veränderung zur Position der Lautsprecher zusätzliche Pegel- und Laufzeitdifferenzen, die eine Lokalisation der Signale verfälschen, da die Ortung nun mehr in Richtung des sich nun näher befindlichen Lautsprechers geht. Der Bereich, in dem die Lokalisation noch nicht von zusätzlichen interauralen Differenzen wesentlich beeinträchtigt wird, heißt Stereohörfläche und ist allgemein sehr klein, wobei eine gewisse Auswanderung der Hörposition nach vorne oder hinten natürlich keine (zumindest theoretisch) Auswirkungen auf die Lokalisation hat.

### 3.3. Laufzeitunterschiede bei Lautsprecherwiedergabe

Eine Phantomschallquelle durch Laufzeitunterschiede wird dann erzeugt, wenn die Laufzeitdifferenz zwischen den Lautsprechern 0 - ca. 1,5 ms beträgt. Bei Differenzen von etwa 3 - 30 ms wird das „Gesetz der ersten Welle“ wirksam: Ein breitbandiges Signal wird dann nur aus der Richtung des Lautsprechers geortet, der das Signal zuerst abstrahlt. Falls die Laufzeitdifferenz 30 - 90 ms beträgt, werden zwei richtungsmäßig und zeitlich getrennte Signale wahrgenommen.

Die Übergänge zwischen diesen Werten und den dadurch hörbaren Phänomenen sind fließend und sehr stark von der Art des Signals abhängig.

Durch die besprochenen qualitativen Unterschiede der Laufzeit in Abhängigkeit von der Frequenz (und der Impulshaftigkeit), genügen bei perkussiven, schmalbandigen Signalen (z.B. Klicks) teilweise schon 0,8 ms, um eine komplett seitliche Ortung zu empfinden. Diese Ortung ist bei etwa (breitbandigen) legato gespielten Streichern vielleicht erst bei 1,5 - 2 ms wahrzunehmen.

Doch eine genaue Zuordnung von spezifischen Signalarten zu Laufzeitunterschieden bei empfundener Ortung von ganz links/rechts kann nicht beschrieben werden, da jeder Mensch etwas anders hört und in dieser Thematik die Meinungen vielfältig sind.

Dieses Phänomen der Lokalisationsunschärfe ist allerdings auch auf die spektrale Beschaffenheit des Signals zurückzuführen:

Anders als Phantomschallquellen, die durch Pegelunterschiede hervorgerufen werden, ist bei Laufzeitunterschieden die akustische Zusammensetzung des Signals von großer Bedeutung für die Fähigkeit der Lokalisation. Dies führt zu einer größeren Fehlerrate beim Einschätzen der Hörereignisrichtung. Das ist jedoch kein Manko, sondern führt eher zu einer sehr räumlichen Abbildung der Aufnahme. Dies liegt auch daran, daß Laufzeitunterschiede bei der Aufnahme nicht nur durch den Wegunterschied zwischen zwei Mikrofonen (und damit natürlich zwischen den Lautsprechern) zustande kommen, sondern daß diese Differenzen auch durch akustische Hindernisse (z.B. Wände) und deren resultierenden Reflexionen entstehen und aufgenommen werden. Dadurch können wir z.B. anhand der ersten Reflexionen der Wände und den so entstehenden Laufzeitunterschieden, die Größe und Beschaffenheit eines Raumes erahnen.

### **3.4. Pegelunterschiede bei Lautsprecherwiedergabe**

Wird ein Signal von beiden Lautsprechern phasen- und zeitgleich abgestrahlt, wird die Lokalisation des selben durch Pegelunterschiede ermöglicht. Die Pegelunterschiede zwischen den Lautsprechern sind nun für die Abbildung des Signals auf der Stereobasis verantwortlich.

Bei den Grenzwerten für Pegelstereofonie ist man sich wiederum nicht ganz einig: Dickreiter gibt für die maximale seitliche Auslenkung (Ortung von einem der beiden Lautsprecher) einen Wert von 15 - 25 dB an. Andere (z.B. Williams) legen diesen Wert schon bei 12 dB fest.

Doch dies ist vom Hörer und dessen Hörerfahrung und Hörgewohnheiten abhängig. Für mich ist bei reiner (lautsprecherbezogener) Pegelstereofonie die maximale Auslenkung eines Signals zu einer Seite erst bei etwa 25 - 30 dB erreicht.

Allgemein läßt sich die Aussage treffen, daß die Auslenkung eines Signals bis etwa  $20^\circ$  linear verläuft und etwa  $2,1 - 2,5^\circ/\text{dB}$  beträgt.

Die Lokalisationsschärfe bei reiner Pegelstereofonie ist um einiges besser als bei reiner Laufzeitstereofonie. Dies kommt durch eine relativ frequenzunabhängige Lokalisation. Im natürlichen Schallfeld sind die Spektralbeugungen um das Hindernis „Kopf“ zu bedenken, welche eine frequenzabhängige Lokalisation zur Folge haben.

Bei der Lautsprecherwiedergabe können diese frequenzabhängigen Verfärbungen allerdings vernachlässigt werden, da jedes Lautsprechersignal unmittelbar und ohne Umwege zum jeweiligen Ohr gelangt. Dies erhöht die Lokalisationsschärfe bei der „unnatürlichen“ Lautsprecherwiedergabe.

### **3.5. Zusammenwirken von Pegel- und Laufzeitdifferenzen bei Lautsprecherwiedergabe**

Eine äußerst natürliche und ausgewogene Form der Lautsprecherwiedergabe erreicht man, indem man Pegel- und Laufzeitdifferenzen zu Hilfe nimmt, da dies der Nachbildung der Signaleigenschaften zwischen beiden Ohren entspricht.

## 4. Stereomikrofonie

### 4.1. Grundlagen und Anforderungen an eine stereofone Aufnahme

Stereofone Aufnahmetechnik (z.B. mit einer Stereomikrofonanordnung) hat die Zielsetzung, die besprochenen Phänomene der zweikanaligen Lautsprecherwiedergabe auszunutzen und somit eine räumliche dreidimensionale akustische Abbildung des Klanggeschehens zu verwirklichen. Mittels verschiedener Stereomikrofonverfahren können nahezu alle Möglichkeiten der Lautsprecherstereofonie genutzt werden. Die Wahl eines Aufnahmeverfahrens hängt meist von der Art der Musik, den Räumlichkeiten und vor allem dem gewünschten Klangbild ab. So zeichnen sich manche Mikrofonverfahren durch eine hohe Lokalisationsschärfe aus, andere wiederum durch eine besonders gute Räumlichkeit.

### 4.2. Stereomikrofonverfahren

Um Klangkörper in ihrer räumlichen Breite und Tiefe abbilden zu können, werden drei verschiedene Arten der Stereomikrofonie benutzt, die sich der Phänomene der Differenzen zwischen beiden Lautsprechern bedienen:

- Pegelstereofonie
- Laufzeitstereofonie
- Äquivalenzstereofonie

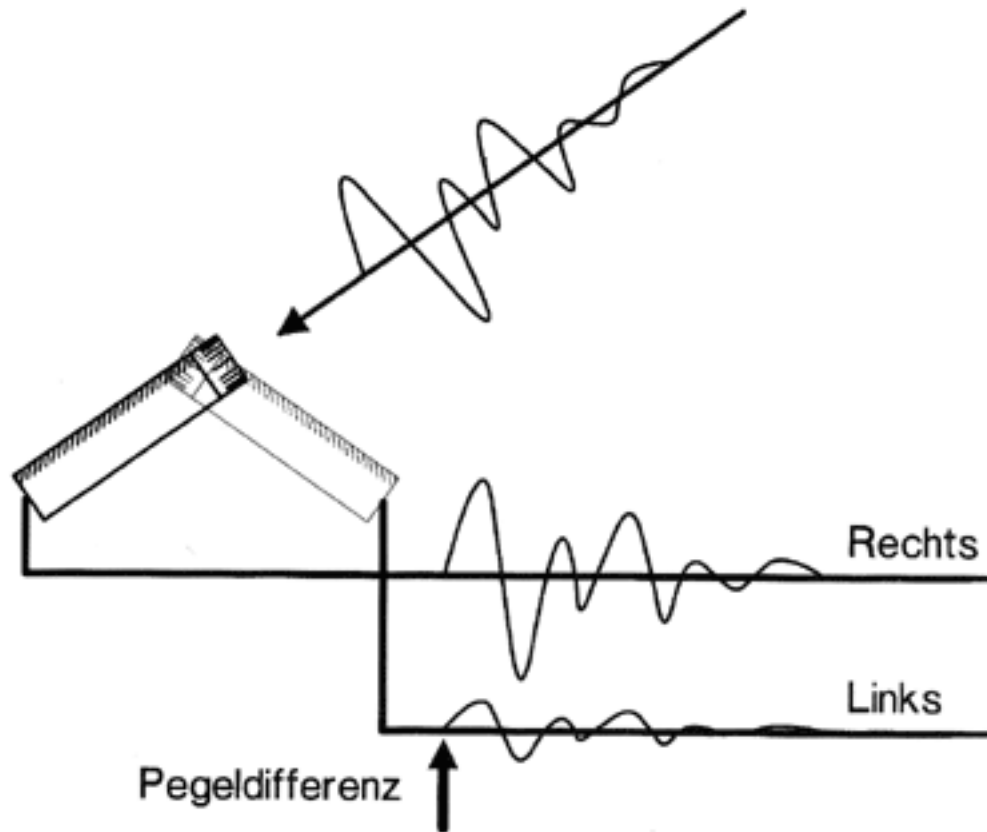
Die ersten zwei Arten werden anhand von je einem Verfahren dargestellt. Die gemischte Stereofonie möchte ich gesondert betrachten.

#### 4.2.1. Pegel- oder Intensitätsstereofonie am Beispiel des XY-Verfahrens

Wie der Name schon sagt, wird die Hörereignisrichtung dieser Stereofonie durch reine Pegelunterschiede zwischen den einzelnen Kanälen bestimmt. Ein Signal, welches z.B. auf dem rechten Kanal 6 dB lauter ist, wird mehr von rechts wahrgenommen. Diese Pegelunterschiede sind für das Gehör in Bezug auf die Lokalisationsschärfe sehr wichtig. Ab etwa 1 kHz wertet das Gehör stark die Pegelunterschiede, weniger aber die Laufzeitunterschiede seitlich

einfallenden Schalls aus, um die Hörereignisrichtung zu beurteilen.  
Diese Pegeldifferenz kommt beim XY-Verfahren durch folgende Konstellation zustande:

### *XY-Anordnung*



Zwei gerichtete Mikrofone (Niere, Superniere oder Hypernieren) werden koinzident (die Kapseln sind horizontal nicht gegeneinander verschoben und möglichst nah beieinander) in einem Winkel aufgebaut, daß seitliche einfallender Schall, bedingt durch die Richtcharakteristik der Mikrofone, von einer Kapsel mit mehr Pegel aufgenommen wird, als von der anderen.

Dabei sollte beachtet werden, daß eine Änderung der empfundenen Hörereignisrichtung erst bei etwa 0,5 dB Pegelunterschied zwischen beiden Kanälen auftritt.

Durch die koinzidente Anordnung der Kapseln werden praktisch keine Phasen- bzw. Laufzeitunterschiede aufgezeichnet. Dadurch ist die Monokompatibilität der gewonnenen Aufnahme sehr gut, da bei einer Summierung der beiden Kanäle keine Kammfiltereffekte und Phasenauslöschungen auftreten.

Eine rein pegelstereofone Aufnahme zeichnet sich durch eine hohe Lokalisationsschärfe aus. Besonders bei Aufnahmen eines großen Klangkörpers mit vielen Instrumenten, können einzelne Signale gut geortet werden. Die

Lokalisationsschärfe ist im Stereo-Center gut und nimmt im Allgemeinen zu den Seiten hin noch zu. Die Abbildung der Räumlichkeit hingegen fällt weniger gut aus.

Der Pegelunterschied  $L$  zwischen beiden Kanälen in Abhängigkeit von der Richtcharakteristik des Mikrofons und des Schalleinfallswinkels kann nach Eberhard Sengpiel [3] folgendermaßen berechnet werden:

$$L \text{ in dB} = 20 * \log X/Y$$

mit

$$X = A + B * \cos(\alpha/2 + \beta)$$

und

$$Y = A + B * \cos(\alpha/2 - \beta)$$

$\alpha$  : Achsenwinkel = Gesamtwinkel zwischen den Mikrofonachsen

$\beta$  : Schalleinfallswinkel von der Mikrofonssystemmitte  $0^\circ$  aus

A: Kugelkomponente der Richtcharakteristik (Druck)

$B * \cos$  : Achterkomponente der Richtcharakteristik (Gradient)

Werte für verschiedene Richtcharakteristika:

Breite Niere:  $A = 0,667$   $B = 0,333$

Niere:  $A = 0,5$   $B = 0,5$

Superniere:  $A = 0,266$   $B = 0,634$

Hypernieren:  $A = 0,25$   $B = 0,75$

Acht:  $A = 0$   $B = 1$

Sengpiel hat weiterhin empirisch gefundene Werte festgelegt, welche die Pegeldifferenz in Abhängigkeit von der empfundenen Hörereignisrichtung auf der Stereobasis beschreiben.

Hörereignis- richtung $b_1$	C	1/4	1/2	3/4	4/4
	0 %	25 %	50 %	75 %	100 % L bzw. R
$\Delta L$	0 dB	3 dB	6,5 dB	11 dB	<b>18 dB</b>

Für eine Hörereignisrichtung 100% - Lokalisation aus der Richtung eines Lautsprechers - wird eine Pegeldifferenz von 16 - 20 dB gefunden.

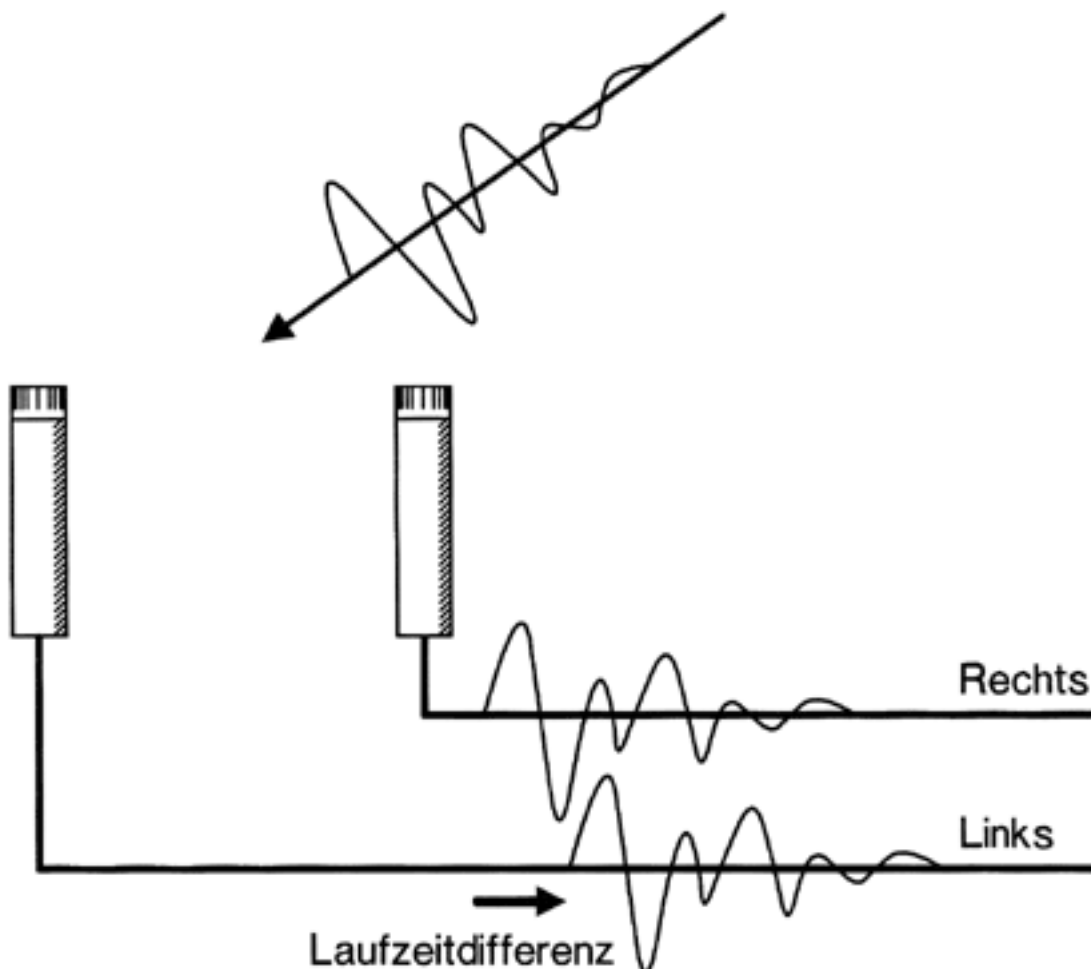
$L_{max} = 18$  dB soll als Rechenwert für kommende Rechnungen angenommen werden.

## 4.2.2. Laufzeitstereofonie am Beispiel des AB-Verfahrens

Laufzeitunterschiede zwischen beiden Lautsprechern können durch eine Aufnahme im AB-Verfahren verwirklicht werden. Die Mikrofonie sieht im allgemeinen folgendermaßen aus:

Zwei Mikrofone, deren Kapseln als Druckempfänger ausgelegt sind (bei einer gewünschten rückwärtigen Dämpfung können auch Nieren, also Gradientenempfänger verwendet werden), werden parallel zueinander, auf einer horizontalen gedachten Linie ausgerichtet, wobei eine sog. Mikrofonbasis  $a$  zwischen beiden Kapseln geschaffen wird. Dadurch wird je nach Abstand der beiden Kapseln zueinander ein Laufzeitunterschied hervorgerufen. Pegelunterschiede treten zwar auch auf, sind jedoch zu vernachlässigen, da sie verschwindend gering sind.

### *AB-Anordnung*



Aufnahmen, die mit dem AB-Verfahren realisiert wurden, zeichnen sich durch eine gute Räumlichkeit bzw. Tiefenstaffelung aus, wobei die Lokalisationsschärfe

bei einzelnen Stimmen oder Instrumenten nachläßt. Dies liegt unter anderem an der Mehrdeutigkeit der Phasenbeziehungen, falls eine Frequenz eine Wellenlänge, die größer als der Kapselabstand ist, aufweist.

Das Verfahren ist somit gut geeignet, um große Räume natürlich wiederzugeben. Gerade für große Klangkörper, deren akustische Ausdehnung im Raum eine große Rolle spielt, ist dieses Verfahren zu empfehlen.

Der Abstand der Kapseln zueinander ist für die Größe des Aufnahmebereiches verantwortlich und wird nach Sengpiel folgendermaßen berechnet:

Mikrofonbasis  $a = t * c / \sin \max.$

c: Schallgeschwindigkeit = 343 m/s

max.: Maximaler Schallaufnahmewinkel von der Mitte, auch als halber nutzbarer Aufnahmebereich zu bezeichnen

t: maximaler Laufzeitunterschied von 1,5 ms

Anders als bei der reinen Pegelstereofonie, gibt es hier Probleme bei einer Mischung in Mono. Durch die Addition beider Kanäle werden sog. Kammfiltereffekte hervorgerufen: Frequenzen, deren Laufzeitdifferenz einem halben Schwingungsvorgang entsprechen, werden wegen ihrer gegensätzlichen Polarität (Phasenlage) ausgelöscht, und zwar maximal bei 0,5 f; 1,5 f; 2,5 f; 3,5 f usw. Nur wenn der Pegel der beiden Signale gleich hoch ist, ergibt sich in diesem Fall eine maximale Auslöschung - dabei sind die Pegelabsenkungen auf einer dB-Skala unendlich tief. Pegelanhebungen von 6 dB ergeben sich, aufgrund von gleicher Phasenlage, zwischen zwei „Kerben“ bei 1 f; 2 f; 3 f usw.

### **4.3. Äquivalenzstereomikrofonie**

Erst die Mischung aus Pegel- und Laufzeitstereofonie bringt meiner Meinung nach ein optimales Klangbild, wenn es um die akustische Abbildung eines Klangkörpers in einem definierten Raum geht. Die gute Lokalisationsschärfe und eine hohe Räumlichkeit werden kombiniert um damit ein möglichst natürliches Abbild der Schallquelle zu reproduzieren.

Dies wird einsichtiger, wenn man bedenkt, daß auch beim menschlichen Ohr beide Arten von interauralen Differenzen für das räumliche Hören verantwortlich sind.

Eine Einschränkung ist bei der Äquivalenzstereofonie die frequenzunabhängige



Aufzeichnung der Differenzen zwischen den Mikrofonkapseln: Während beim „natürlichen“ Hören die Art der Lokalisation (eher pegelmäßig oder eher laufzeitbedingt) von der Frequenzverteilung innerhalb des Signals abhängig ist, nimmt ein Mikrofonsystem hier keine Differenzierung vor, sondern zeichnet frequenzunabhängig beide Arten der unterschiedlichen Richtungsparameter auf. Somit sind technisch bedingte Einschränkungen hinzunehmen, doch trotzdem möchte ich behaupten, daß - im Gegensatz zu reinen Pegel- oder Laufzeitverfahren - nur eine Aufnahme im Äquivalenzverfahren ein zufriedenstellendes Ergebnis bringt, wenn die Zielsetzung eine natürliche Reproduktion des Klangeignisses ist.

In der Praxis werden solche Aufnahmeverfahren wie folgt realisiert:

Die gerichteten Mikrofonkapseln (in den meisten Fällen Nieren, also Gradientenempfänger) werden in einem bestimmten horizontalen Abstand, mit einem bestimmten Winkel zueinander positioniert. Durch die Mikrofonbasis kommen Laufzeitunterschiede zustande, durch den Achsenwinkel die Pegelunterschiede. Je nach Abstand und Winkel der Mikrofone wird nun ein Verhältnis zwischen Laufzeit- und Pegeldifferenz geschaffen.

Es gibt allerdings noch weitere Methoden:

Sie werden allgemein als Trennkörperverfahren bezeichnet. Hierbei werden meist ungerichtete Kapseln verwendet, welche durch einen akustischen Trennkörper teilweise voneinander isoliert sind. Beispiele dafür sind der Kunstkopf oder das Kugelflächenmikrofon. In dieser Arbeit möchte ich allerdings nicht im Wesentlichen auf diese Arten der Mikrofonie vergleichen, da sie eine kopfbezogene Stereophonie repräsentieren und nicht eine raumbezogene: Der Kunstkopf z.B. arbeitet mit zwei Druckempfängern, die anstelle der Ohren in einem dem menschlichen Kopf nachempfundenen Trennkörper angebracht sind. Dies hat zur Folge, daß durch das akustische Hindernis „Kopf“ zwischen den beiden Kapseln frequenzabhängige Pegelunterschiede entstehen (Spektraldifferenzen). Damit wird die Abschattung des Signals durch den menschlichen Kopf schon bei der Aufnahme hervorgerufen. Wenn nun diese Aufnahme über ein System aus zwei Lautsprechern wiedergegeben wird, wirkt unser Kopf beim Hören abermals als Trennkörper. Somit werden die interauralen Spektraldifferenzen noch stärker wirksam, als es beim Hören einer natürlichen Schallquelle der Fall ist. Diese Aufnahmeverfahren eignen sich somit ideal zur Kopfhörerwiedergabe, da hier durch die direkte Koinzidenz von Schallquelle (Kopfhörer) und Empfänger (Ohr) keine Frequenzdifferenzen zwischen den Ohren auftreten und somit in der Aufnahme diese bereits vorhanden sein müssen.

Da sich meine Arbeit aber mit der Wiedergabe von stereofonen Aufnahmen

über ein Lautsprechersystem beschäftigt, werde ich nicht näher auf diese Art der Mikrofonie eingehen.

### **4.3.1. Theoretische Grundlagen der gemischten Stereophonie**

Anders als bei der reinen Pegel- bzw. Laufzeitstereophonie, gestaltet sich die Berechnung des Verhältnisses zwischen beiden Differenzarten und die dadurch zu nutzenden Werte für Mikrofonbasis und Achsenwinkel viel komplizierter.

Einer der ersten, der solche Berechnungen anstellte, war Michael Williams, der durch seine „Williams-Kurven“ bekannt wurde. Anhand dieser Kurven kann man bestimmen, welche Mikrofonbasis und welcher Achsenwinkel zu welchem nutzbaren Aufnahmebereich führen.

Für meine Berechnung möchte ich mich allerdings nicht auf seine Theorien stützen, da diese auf Werten beruhen, die ich als zu gering empfinde. Williams geht von einer maximalen Pegeldifferenz von 12 dB und einer maximalen Laufzeitdifferenz von 1,12 ms aus, um ein Signal aus der Richtung eines Lautsprechers zu orten. Dies ist subjektiv für mich zu wenig und verfälscht meiner Meinung nach somit die Werte für eine korrekte Aufstellung des Mikrofonieverfahrens, da mit diesen Maximalwerten nie eine optimale Ausnutzung der Stereobasis gewährleistet sein kann.

Um die Zusammenhänge zwischen Mikrofonbasis, Achsenwinkel und nutzbarem Aufnahmebereich zu erklären möchte ich den Denkansatz von Eberhard Sengpiel verfolgen, der seinen Berechnungen andere Maximalwerte zugrunde legt.

Er geht beim maximalen L-Wert von 18 dB Pegelunterschied aus, was mir in der heutigen Zeit von hart links/rechts gepantenen Signalen der modernen Popmusik weitaus realistischer erscheint. Der t-Wert ist kritisch zu betrachten, da dieser mehr als der L-Wert von der akustischen Zusammensetzung des Signals abhängt. Impulshafte Signale werden von vielen Menschen z.B. schon bei 0,5 ms Laufzeit aus der Richtung eines Lautsprechers lokalisiert. Bei Signalen, wie Dauertönen (oder z.B. einer legato gespielten Querflöte) wird eine derartige Lokalisation eher erst bei 1,8 - 2 ms empfunden. Dadurch kommt ein sehr breiter t-Wert zustande, der von Sengpiel empirisch auf 1,5 ms festgelegt wurde.

Ausgegangen werden muß von der Hörereignisrichtung  $b$  (in %), welche die Lokalisation aus der Richtung eines Lautsprechers darstellt. Die Hörereignisrichtung setzt sich aus den Hörereignisrichtungen  $b_1$  (L) und  $b_2$

( t) zusammensetzt. Hierbei ist  $b_1$  ( L) diejenige Hörereignisrichtung, die sich allein durch Pegeldifferenzen ergibt und  $b_2$  ( t) ist die Hörereignisrichtung, die sich allein durch die Laufzeitdifferenz einstellt. Für eine bestimmte maximale Lokalisation  $b$  in Prozent ist die Summe aus  $b_1$  und  $b_2$  konstant und es sind viele Kombinationen denkbar.

Folgende Werte, gleichsinniger Pegel- und Laufzeitdifferenz sind nach Sengpiel festgelegt:

$b_1$	$\Delta L$	$b_2$	$\Delta t$
0 %	0 dB	100 %	1,5 ms
5 %	0,55 dB	95 %	1,312 ms
10 %	1,13 dB	90 %	1,125 ms
15 %	1,73 dB	85 %	1,020 ms
20 %	2,36 dB	80 %	0,906 ms
25 %	3,0 dB	75 %	0,81 ms
30 %	3,66 dB	70 %	0,727 ms
35 %	4,33 dB	65 %	0,655 ms
40 %	5,03 dB	60 %	0,592 ms
45 %	5,75 dB	55 %	0,534 ms
50 %	6,5 dB	50 %	0,48 ms
55 %	7,29 dB	45 %	0,429 ms
60 %	8,12 dB	40 %	0,379 ms
65 %	9,01 dB	35 %	0,329 ms
70 %	9,96 dB	30 %	0,280 ms
75 %	11,0 dB	25 %	0,23 ms
80 %	12,13 dB	20 %	0,180 ms
85 %	13,36 dB	15 %	0,132 ms
90 %	14,76 dB	10 %	0,084 ms
95 %	16,29 dB	5 %	0,040 ms
100 %	18,0 dB	0 %	0 ms

Die Differenzen  $\Delta L$  und  $\Delta t$  sind mit folgenden Formeln zu berechnen:

$$L = 20 \log \frac{(A + B \cdot \cos(\theta/2 + \alpha))}{(A + B \cdot \cos(\theta/2 - \alpha))}$$

und

$$t = \frac{\Delta L}{c} \cdot \sin \theta$$

Sobald diese gefunden sind, können daraus die beiden Hörereignisrichtungen berechnet werden:

$$b_1 = 1,729350 * 10^{-4} * L^4 - 4,932668 * 10^{-3} * L^3 - 0,148525 * L^2 + 8,818633 * L$$

$$b_2 = 21,090084 * t^4 - 61,293151 * t^3 + 17,099029 * t^2 + 107,748680 * t$$

Damit kann bestimmten Pegel- und Laufzeitdifferenzen - durch Spezifizierung des Achsenwinkels  $\alpha$  und der Mikrofonbasis  $a$  - eine genaue Hörereignisrichtung zugeordnet werden.

Beispiel:

Ein Mikrofonsystem mit zwei Nierenkapseln hat einen Achsenwinkel von  $90^\circ$  und eine Mikrofonbasis von 25 cm.

Für einen Schalleinfallswinkel  $\varphi$  von  $30^\circ$  ergibt sich somit:

$$L = 3,87 \text{ dB}$$

und

$$t = 0,3 \text{ ms}$$

Rechnet man dieses in die Hörereignisrichtungen um, so erhält man folgende Werte:

$$b_1(L) = 31,7\%$$

und

$$b_2(t) = 38,9\%$$

Dies ergibt eine Hörereignisrichtung  $b(L, t)$  von 70,6%.

Über diese Methode läßt sich auch der maximal nutzbare Aufnahmebereich eines Systems ermitteln.

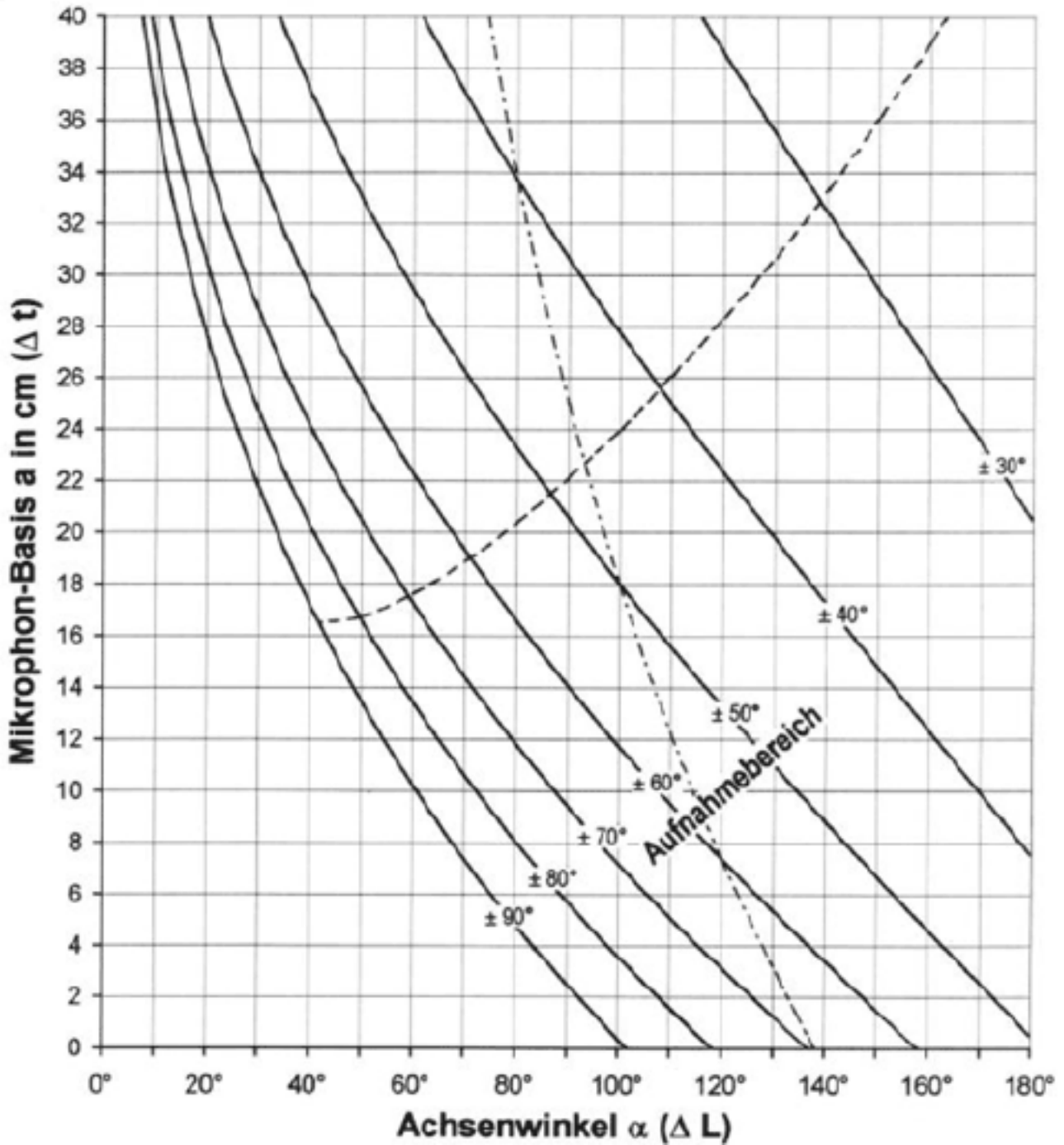
Durch das Überprüfen von weiteren möglichen Einfallswinkeln  $\varphi$ , erhält man schließlich bei  $45^\circ$  folgende Werte:

$L = 6,02 \text{ dB}$ . Dies entspricht der Hörereignisrichtung  $b_1 = 46,9\%$ .

$t = 0,515 \text{ ms}$ . Dies entspricht der Hörereignisrichtung  $b_2 = 53,1\%$ .

Daraus ergibt sich eine Hörereignisrichtung  $b(L, t)$  von 100%. Dies bedeutet, daß das Mikrofonsystem bei  $\pm 45^\circ$  Schalleinfallswinkel eine Lokalisation von 100% Auslenkung zu einem Lautsprecherhin bewirkt. Damit liegt der maximale Aufnahmebereich bei  $90^\circ$ . Unter Zuhilfenahme dieser Methode hat Sengpiel seine eigenen Äquivalenzkurven aufgestellt.

*Aufnahmebereich für Äquivalenz-Mikrofonsysteme mit Nieren*



Aus gleichsinniger Kombination  $t \Rightarrow$  Mikrofonbasis  $a$  und  $L \Rightarrow$  Achsenwinkel  $\alpha$  ergibt sich der volle Aufnahmebereich des Mikrofonsystems angegeben in  $\pm$  °. Dabei ist der Achsenwinkel der Gesamtwinkel zwischen den Mikrofon-Hauptachsen.

Als Beispiel ergibt die Kombination 22 cm und  $120^\circ$  oder 30 cm mit  $90^\circ$  (NOS) oder 40 cm mit  $60^\circ$  einen maximalen Schalleinfallswinkel von  $\max = \pm 41^\circ$  für 100% Hörereignisrichtung, was einem Aufnahmebereich von  $\pm 41^\circ = 82^\circ$  entspricht. Subjektiv kann dabei die unterschiedliche Äquivalenzwirkung von  $L$  und  $t$  gehört werden, je nachdem, ob man sich mehr auf der Pegeldifferenz- oder der Laufzeitdifferenzseite befindet.

Von theoretischer Bedeutung könnte die gestrichelte Gleichwertigkeitskurve sein, bei der  $L$  und  $t$  gleichermaßen zur Hörereignisrichtung beitragen. Die strichpunktierte Linie gibt im Zusammenhang mit der Mikrofonbasis  $a$  an, bei welchem Achsenwinkel die Hauptachsen der Mikrofone genau auf die beiden Außenflanken des nutzbaren Aufnahmebereiches zeigen.

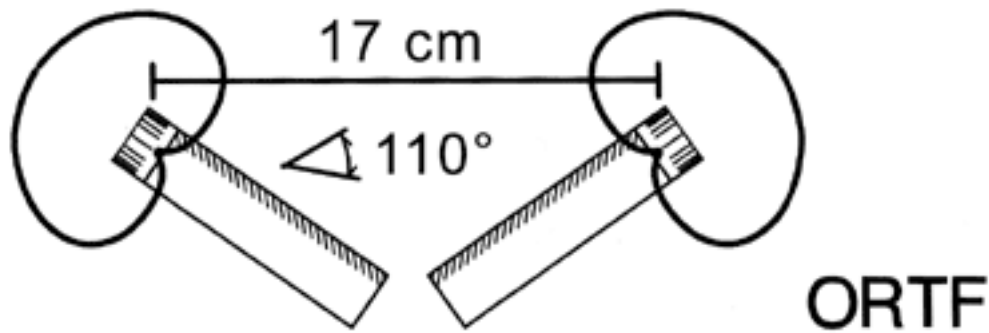
#### **4.4. Vorstellung von drei Äquivalenzstereofonieverfahren**

##### **4.4.1. ORTF**

Aus Frankreich kommt das erste Verfahren namens ORTF (Office de Radiodiffusion Télévision Française). Es hat sich gegenüber anderen Verfahren wie EBS, RAI oder OLSON, durch seine universelle Anwendbarkeit, weitestgehend durchgesetzt.

Richtcharakteristik, Versatzwinkel und Abstand der Kapseln sind festgelegt:

- Die Kapseln sind Gradientenempfänger mit Nierencharakteristik.
- Die Mikrofonbasis  $a$  beträgt 17 cm und nicht 17,5 cm wie irrtümlicher Weise immer wieder angenommen wird. Die Mikrofonie wurde nicht unter Berücksichtigung des Ohrabstands entwickelt. Dieser Wert wurde aus Gründen der resultierenden Hörereignisrichtung  $b_2$  festgelegt.
- Der Achsenwinkel  $\alpha$  der Mikrofone beträgt  $110^\circ$ .



Der maximale Aufnahmewinkel der Anordnung beträgt etwa  $96^\circ$  für 100% Lokalisation aus der Richtung eines Lautsprechers.

Betrachtet man sich das Zusammenwirken der beiden Werte  $L$  und  $t$ , so stellt man fest, daß bei einer maximalen Auslenkung der Schallquelle von  $\alpha_{\max} = 48^\circ$  der

$L$ -Wert bei etwa 8,2 dB liegt und der  $t$ -Wert bei etwa 0,368 ms.

Dies entspricht den Hörereignisrichtungen

$b_1(L) = 60,5\%$  und

$b_2(t) = 39,5\%$ .

Das heißt, daß Pegelunterschiede zu etwa 60% und Laufzeitunterschiede zu etwa 40% an der Hörereignisrichtung dieser Mikrofonie beteiligt sind. Somit zeichnet sie sich durch eine größere Lokalisationsschärfe als Räumlichkeit aus.

Thomas Görne behauptet in „Mikrofone in Theorie und Praxis“ [4], daß die Pegelunterschiede und Laufzeitunterschiede bei diesem Verfahren in etwa den Verhältnissen beim natürlichen Hören entsprechen. Diese Aussage halte ich für anzweifelenswert, da allgemein bekannt ist, daß dieses Verhältnis beim natürlichen Hören extrem stark von der spektralen Zusammensetzung, der akustischen Beschaffenheit und der Impulshaftigkeit des Signals abhängt.

Anwendungsgebiete:

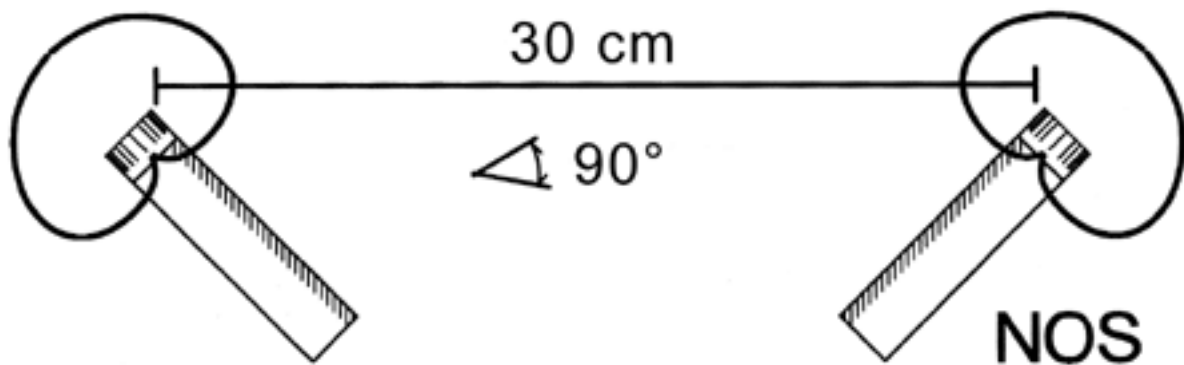
Das ORTF-Verfahren ist aufgrund seiner relativ hohen Lokalisationsschärfe für viele Anwendungszwecke interessant. Es wird vor allem bei Aufnahmen von Orchestern, Chören oder anderen akustisch unverstärkten Ensembles benutzt, da einzelne Instrumente gut zu orten sind und trotzdem eine natürliche Räumlichkeit bewahrt wird. Doch auch als Overhead- oder Ambience-

Mikrofonie beim Schlagzeug können gute Ergebnisse erzielt werden. Gerade der Raumklang eines Drumsets profitiert meistens stark von der Kombination aus Lokalisationsschärfe und etwas Tiefenstaffelung.

#### 4.4.2. NOS

Diese Mikrofonie stammt aus den Niederlanden (Nederlandsche Omroep Stichting). Auch bei dieser Mikrofonie ist der Aufbau festgelegt:

- Die Kapseln sind Druckgradientenempfänger mit Nierencharakteristik.
- Die Mikrofonbasis  $a$  beträgt 30 cm.
- Der Achsenwinkel der Mikrofone beträgt  $90^\circ$ .



Der maximale Aufnahmewinkel der Anordnung beträgt etwa  $81^\circ$  für 100% Hörereignisrichtung von einem Lautsprecher.

Betrachtet man sich das Zusammenwirken der beiden Werte  $L$  und  $t$ , so stellt man fest, daß bei einer maximalen Auslenkung der Schallquelle von  $\alpha_{\max} = 40,5^\circ$  der

$L$ -Wert bei etwa 5,42 dB und der  $t$ -Wert bei etwa 0,573 ms liegt.

Dies entspricht den Hörereignisrichtungen

$b_1(L) = 42,2\%$  und

$b_2(t) = 57,8\%$ .

Das heißt, daß Pegelunterschiede zu etwa 42% und Laufzeitunterschiede zu



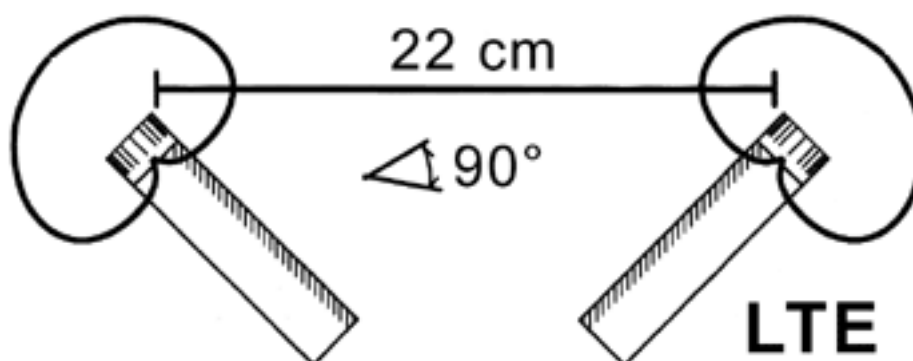
etwa 58% an der Hörereignisrichtung dieser Mikrofonie beteiligt sind. Somit zeichnet sich dieses Verfahren im Gegensatz zu ORTF durch eine etwas höhere Tiefenstaffelung bei verminderter Lokalisationsschärfe aus.

Auch bei diesem Verfahren sind die Anwendungsgebiete vielseitig: Durch seine hohe Räumlichkeit und die noch geringer ausgeprägte Lokalisationsschärfe, eignet es sich als Alternative zu ORTF bei Aufnahmen von Orchestern und Chören, wenn ein räumlicheres Klangbild erwünscht ist. Desweiteren ist die Aufnahme von szenischen Klangereignissen, wie Theateraufführungen oder Hörspielen mit NOS beliebt. Hierbei zählt eher eine natürliche Abbildung der Lokalisationen, in der sich die Sprecher gerade befinden. Die etwas geringere Lokalisationsschärfe kann hier vernachlässigt werden. Auch als Ambiente-Mikrofonie am Schlagzeug kommt es - mehr noch als ORTF - dem Raumklang der Aufnahme zu gute.

#### 4.4.3. LTE

Dieses Mikrofonverfahren habe ich mit Hilfe von Hörversuchen und theoretischen Berechnungen nach Sengpiel entworfen. Der Name LTE ist eine Abkürzung, welche für das besondere Merkmal dieser Mikrofonie steht: LTE bedeutet level/ time equality, was ausdrücken soll, daß L und t gleichwertig an der Hörereignisrichtung beteiligt sind. Doch dazu später mehr. Auch dieses Verfahren hat feste Werte für eine korrekte Mikrofonanordnung:

- Die Kapseln sind Druckgradientenempfänger mit Nierencharakteristik.
- Die Mikrofonbasis  $a$  beträgt 22 cm.
- Der Achsenwinkel der Mikrofone beträgt  $90^\circ$ .



Der maximale Aufnahmewinkel  $q_{\max}$  der Anordnung beträgt etwa  $96^\circ$  für eine 100%ige Ortung aus der Richtung eines Lautsprechers.

Betrachtet man sich das Zusammenwirken der beiden Werte  $L$  und  $t$ , so wird festgestellt, daß bei einer maximalen Auslenkung  $\alpha_{\max} = 48^\circ$  der Schallquelle - zur  $0^\circ$  Richtung des Systems - der

$L$ -Wert bei etwa 6,49 dB liegt und der  
 $t$ -Wert bei etwa 0,478 ms.

Dies entspricht den Hörereignisrichtungen

$b_1(L) = 50\%$  und

$b_2(t) = 50\%$ .

Dies bedeutet, daß Pegelunterschiede und Laufzeitunterschiede zu gleichen Teilen an der Hörereignisrichtung dieser Mikrofonie beteiligt sind, welche eine sehr natürliche Darstellung des Klanggeschehens ermöglicht.

Damit möchte ich nicht behaupten, daß dies das einzig richtige Verhältnis zwischen Pegel- und Laufzeitdifferenzen ist, doch hat diese Kombination durchaus ihre klanglichen Vorzüge.

Anwendungsgebiete:

Da das LTE-Verfahren guten Gewissens als ein Kompromiß aus ORTF und NOS betrachtet werden kann, ist somit eine ganze Menge von Anwendungsbereichen mit LTE abzudecken.

Persönlich habe ich gute Erfahrungen mit Aufnahmen klassischer Musik gemacht. Auch eignet sich die Mikrofonierung zur Abnahme eines Schlagzeugs als Mischung aus Overheads und Ambience-Mikrofonie (siehe Kapitel 5.2.1.). Mit der Aufzeichnung von Hörspielen habe ich ebenfalls durchweg positive Ergebnisse erzielt.

## **5. Vergleich, Bewertung und Analyse von verschiedenen Stereomikrofonieverfahren anhand von Hörbeispielen**

Der eher praktische Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse und Bewertung der Hörbeispiele, die auf der beiliegenden CD enthalten sind. Der erste Teil befasst sich mit Vergleichen von verschiedenen Stereomikrofonieverfahren. Diese werden hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Abbildung eines Klangkörpers im definierten Raum analysiert. Der zweite Teil zeigt Beispiele für Anwendungsgebiete des LTE-Verfahrens auf und beschreibt dessen Einsatz in der Praxis.

### **5.1. Beispiele zu den gemischten Verfahren im Vergleich mit XY- und AB-Verfahren**

Um ORTF, LTE, NOS, XY und AB in Bezug auf klangliche Aspekte miteinander vergleichen zu können, habe ich Hörbeispiele aufgenommen, in denen die Unterschiede der einzelnen Verfahren zu hören und zu bewerten sind.

#### **5.1.1. Produktion der Hörbeispiele**

Die Hörbeispiele zu den verschiedenen Mikrofonieverfahren wurden am 14.8. 2001 in der Kirche St. Michael in Ingelheim aufgenommen. Diese Räumlichkeit wurde ausgewählt, um der Aufnahme viel Diffusschall zukommen zu lassen. Verwendet wurde dabei folgendes Equipment:

Als Schallwandler kamen Oktava MK 012 Kleinmembrankondensatormikrofone zum Einsatz. Diese wurden über die pultinternen Mikrofonvorverstärker eines Mackie 1402-VLZ Pro Mischpultes verstärkt. Als Aufnahmemedium verwendete ich ein Tascam DA 78HR - einen digitalen 8-Spur-Recorder, auf den mit 24 Bit Wortbreite aufgezeichnet wurde.

Alle Mikrofonanordnungen wurden in etwa 2,5 m Höhe in der gleichen Position aufgebaut und waren dabei 3,5 - 4 m von den Musikern entfernt. Da durch die Verfügbarkeit von acht Spuren nur 4 Stereospuren gleichzeitig aufgenommen werden konnten, wurden beim ersten Durchgang das ORTF- und das LTE-Verfahren aufgezeichnet. Beim zweiten Durchgang folgten XY, NOS und AB.

Aufgenommen wurde ein Auszug des Titels „Only when I sleep“ der Gruppe „The Corrs“. Das Stück wurde als Instrumental von zwei Gitarren und einer Trompete gespielt. Die Trompete befand sich während der Aufnahme in etwa

0°EinsprechrichtungderMikrofonanordnungen. DieGitarrenwurdenetwa50° links und rechts der Systeme positioniert, um das Stereobild des Klangkörpers möglichst breit zu gestalten.

Die Spuren wurden dann digital auf das HD-Recordingsystem Pro Tools überspielt, dort geschnitten, normalisiert und auf CD gebrannt.

Die Tracks auf der CD:

1. XY-Verfahren mit Gradientenempfänger kapseln (Niere) und einem Achsenwinkel von 131°
2. ORTF-Verfahren
3. LTE-Verfahren
4. NOS-Verfahren
5. AB-Verfahren mit Druckempfänger kapseln (Kugelcharakteristik) und einer Mikrofonbasis a von 60 cm

Wie zu bemerken ist, sind die Verfahren in der Reihenfolge steigender Räumlichkeit und sinkender Lokalisationsschärfe geordnet. Dies ermöglicht das schnelle Wechseln zwischen zwei Verfahren mit ähnlichem Verhältnis von Pegel- zu Laufzeitunterschieden.

### **5.1.2. Vergleich und Bewertung der fünf Verfahren**

Folgende Ausführungen zum Vergleich der Systeme sind selbstverständlich rein subjektiv und nicht als Maßstab für dritte oder als einzig korrekte Auffassung anzusehen. Ich habe mich bemüht, meine Hörempfindungen verständlich zu gestalten. Trotzdem sollte man im folgenden etwas tontechnische Phantasie zeigen um meine Empfindungen besser nachvollziehen zu können.

XY:

Die Darstellung des Klangbildes mit Hilfe des XY-Verfahrens wirkt akustisch sehr scharf, die einzelnen Instrumente sind gut zu orten. Die Gitarren sind relativ weit außen und die Trompete definitiv in der Mitte positioniert. Der gesamte Klangkörper befindet sich „weit vorne“ auf einer gedachten Hörebene zwischen den Lautsprechern.

Dies wirkt zwar sehr direkt, doch dadurch, daß sich die akustische Tiefe des Raumes (Diffusschall) - bedingt durch die fehlenden Laufzeitdifferenzen - nun virtuell auf einer Hörebene mit dem Direktschall befindet, lässt der Eindruck,

einer erahnten großen Räumlichkeit, hervorgerufen durch Hallfahnen, stark nach. Dies mindert den natürlichen Eindruck der Akustik des Raumes. Die Aufnahme wirkt flach.

#### ORTF:

Beim Anhören des ORTF-Verfahrens im direkten Vergleich mit XY fiel mir sofort auf, daß sich das wesentliche Klanggeschehen zwar immer noch „im Vordergrund“ abspielt, jedoch nicht mehr alle akustischen Informationen über die Tiefe des Raumes auf gleicher Ebene lagen.

Man hat nun das Gefühl, daß der natürliche Hall des Raumes seine Attacke nicht mehr von der Membran des Lautsprechers aus direkt ins Ohr startet, sondern sich eine gewisse, wenn auch nicht all zu große Tiefe, bereits „hinter den Lautsprechern“ entwickelt. Desweiteren hat man das Gefühl, daß sich die Gitarren noch stärker auf den jeweiligen Lautsprecher fixieren. Nicht, daß die Lokalisationsschärfe bei ORTF höher wäre als bei XY, jedoch klingt sie natürlicher.

#### LTE:

Im Vergleich mit ORTF sind in punkto Aufnahmewinkel erst mal keine gravierenden Unterschiede festzustellen, da beide Verfahren einen Aufnahmebereich von  $96^\circ$  besitzen. Auch hier werden die Gitarren weit außen auf der Stereobasis abgebildet, da sie etwa auf den Außenflanken des nutzbaren Aufnahmebereichs positioniert sind ( $50^\circ$ ).

Die Laufzeitunterschiede sind bei LTE stärker ausgeprägt als bei ORTF. Trotzdem nimmt der räumliche Eindruck noch nicht überhand. Es entsteht eine sehr präzise Abbildung der Räumlichkeiten hinsichtlich der ersten Reflexionen. Man hört relativ gut die Reflexionen der linken Gitarrenstimme, die mit einem Zeitversatz auf der rechten Seite zu bemerken sind. Doch beeinträchtigt dieses nicht die Lokalisationsschärfe der gesamten Aufnahme.

Das gleichwertige Verhältnis zwischen Pegel- und Laufzeitdifferenzen ist hier meiner Meinung nach wohl zu erkennen.

#### NOS:

Beim Anhören dieses Verfahrens sind die Unterschiede zu LTE am Anfang nicht offensichtlich. Erst beim genauen Hinhören merkt man, daß die Tiefe des Raumes noch zugenommen hat und die Lokalisation - auch die der Trompete - zunehmend schwerer wird. Es scheint, als ob die Schallquelle etwas weiter weggerückt ist. Auch wenn diese Phänomene subtil sind, denke ich, daß ihr Zusammenwirken der selben eine große Wirkung zeigt.

AB:

Beim Hören dieser Aufnahme wird man sofort von einer Flut aus phasenungleichen Signalen überrascht, die übereinander hereinbricht. Der Hörer ist einem bunten Chaos aus Reflexionen und Hallfahnen ausgesetzt, aus dem nur schwerlich zu erkennen ist, ob die Trompete wirklich aus der Mitte der Lautsprecherbasis tönt. Bedingt auch durch die Kugelcharakteristik der Kapseln, wird rückwärtiger Schall kein bisschen gedämpft. Dies führt natürlich dazu, daß der Raum noch größer erscheint. Man hat das Gefühl, als ob sich der Raum vor, zwischen, hinter und neben den Lautsprechern ausbreitet.

Dieses enorme Raumgefühl erkaufte man sich aber mit einer dermaßen schlechten Ortung der einzelnen Instrumente, daß man fast meinen möchte, es wäre egal gewesen, wo im Raum sich die Musiker positionieren.

Meiner Meinung nach sind die Unterschiede zwischen allen Verfahren gut zu hören. Auch wenn die Differenzen zwischen den Äquivalenzsystemen etwas subtiler ausfallen, ist ein klares Verhältnis zwischen Pegel- und Laufzeitunterschieden bei jedem dieser Verfahren erkennbar. Persönlich haben mich die LTE- und die NOS-Mikrofonie besonders angesprochen. Bei diesen Aufnahmen empfinde ich die Darstellung des Klanggeschehens - durch sowohl Direkt- als auch Diffusschallanteile - als sehr natürlich.

## **5.2. Beispiele für die praktische Anwendung des LTE-Verfahrens**

Auf der CD sind weiterhin Beispiele, welche die Anwendung dieses Äquivalenzverfahrens in der Praxis verdeutlichen.

### **5.2.1. LTE als Raummikrofonie am Schlagzeug**

Unter anderem habe ich mich der Schlagzeugaufnahme gewidmet, bei welcher durch diese Mikrofonie besonders interessante Ergebnisse erzielt werden können.

Die Beispiele auf der CD sind einer Demoaufnahme der Band „Twist“ entnommen. Das besondere an diesem Recording ist die kombinierte Aufnahme der Overheads und Ambience und des Raumes. Die Mikrofonierung sah folgendermaßen aus:

Ein LTE-Verfahren wurde in etwa 1 m Abstand zum Schlagzeug und etwa knapp über Kopfhöhe positioniert. Wichtig ist, daß die Anordnung vor dem Set aufgestellt wurde und nicht dahinter. Die Kapseln wurden leicht nach unten

geneigt, aber nicht direkt auf die Becken oder den Rest des Drumsets.

Die Tracks auf der CD:

6. Set ohne Raummikrofonie
7. Set mit gegateter Raummikrofonie, getriggert durch Snare
8. Set mit Raummikrofonie
9. Nur Raummikrofonie

Die Beispiele zeigen die Einsatzmöglichkeiten dieses Verfahrens. Je nach Stilrichtung und Geschmack kann die Mikrofonie zum Direktsignal dazugemischt werden. Ob als Raumsignal, als Beckenstütze oder als natürlicher Raumhall auf der Snaredrum. Wenn man die Kapseln weiter runter in Richtung des Schlagzeugs neigt, kann man das Verfahren auch als Hauptmikrofonie für z.B. ein Jazzkit verwenden.

### **5.2.2. LTE als Hauptmikrofonie für klassische Aufnahmen**

Desweiteren habe ich das LTE-Verfahren als Hauptmikrofonie bei Aufnahmen von Chor und Orchester benutzt. Auf Track 10 der CD ist dies zu hören.

Die Aufnahme entstand am 20.5.2001 in der Kirche St. Michael in Ingelheim. Es handelt sich hierbei um das Gloria in D-Dur für Sopran, Alt, Chor und Orchester von Antonio Vivaldi.

Die Mikrofonie wurde hierbei in etwa 4,5 m Höhe aufgebaut. Die Anordnung war etwa 3 m vom Orchester und 6 m vom Chor entfernt. Dieser klingt dadurch teilweise etwas indirekt, doch leider hatte ich keine Stützmikrofone zur Hand.

Da weder das Orchester noch der Chor den Aufnahmebereich des Mikrofonsystems voll ausnutzten, ist die Aufnahme nicht gleichmäßig über die komplette Stereobasis verteilt. Dies ist jedoch nicht nachteilig, da trotzdem ein Klangbild geschaffen wird, welches eine gute Lokalisation der einzelnen Instrumente und der Stimmen von Chor und Sologesang aufweist und sich durch räumliche Tiefe auszeichnet.

## **6. Schlußbetrachtung**

Auch wenn die Wiedergabe über nur zwei Lautsprecher eine radikale Vereinfachung des ursprünglichen Schallfeldes darstellt, ist es möglich, eine relativ natürliche Abbildung des Klanggeschehens zu erzeugen.

Dies ist die Aufgabe von uns Tontechnikern, alle Möglichkeiten einzusetzen, das optimale Ergebnis zu erzielen. Mit Hilfe von Äquivalenzstereofonie kommen wir diesem Ziel wohl schon recht nahe.

Auch wenn wir technische Einbußen in Kauf nehmen müssen, ist es mit Hilfe von theoretischem Grundwissen, praktischen Erfahrungswerten und ein bißchen tontechnischer Phantasie möglich, einen Klangkörper naturgetreu auf einem Lautsprechersystem wiederzugeben.

Die stereofone Aufnahmetechnik kann weder allein vom künstlerischen Standpunkt aus betrachtet werden, noch kann die theoretische Seite eine alleinige Richtlinie sein. Man muß meist einen Kompromiß aus subjektiver Empfindung und fundierter Theorie eingehen, um das gewünschte Ergebnis zu erhalten.

Eine genaue Zielsetzung und Vorstellung des Klangs ist deswegen das A und O einer guten Stereoaufnahme.



## Quellen- und Literaturverzeichnis:

- [1] J. Blauert  
„Räumliches Hören“, Hirzel Verlag Stuttgart, 1974
- [2] M. Dickreiter  
„Handbuch der Tonstudioteknik“, Saur Verlag München, 1997
- [3] E. Sengpiel  
„Forum für Mikrofonaufnahmetechnik und Tonstudioteknik“,  
<http://www.sengpielaudio.com>
- [4] T. Görne  
„Mikrofone in Theorie und Praxis“, Elektor Verlag Aachen, 1996
- G. Martin  
„Geoff Martin´s Audio Pages“,  
<http://www.microtec.net/heisen/geoff/audio/textbook/recording/05.html>

## Abbildungsverzeichnis:

- J. Blauert  
„Räumliches Hören“, Hirzel Verlag Stuttgart, 1974
- M. Dickreiter  
„Handbuch der Tonstudioteknik“, Saur Verlag München, 1997
- E. Sengpiel  
„Forum für Mikrofonaufnahmetechnik und Tonstudioteknik“,  
<http://www.sengpielaudio.com>
- T. Görne  
„Mikrofone in Theorie und Praxis“, Elektor Verlag Aachen, 1996